

考える脳・動かす脳・感じる脳

「協調と制御」領域 本田 学

要旨

本研究では、『考える脳』と『動かす脳』の共通性」および「環境を『感じる脳』による行動制御」を切り口として、思考が環境との間で協調的・調和的に制御される脳内メカニズムにアプローチすることを目指した。ポジトロン断層撮像法、磁気共鳴機能画像、経頭蓋磁気刺激、多チャンネル脳電位トポグラフィといった複数の先端的な脳機能イメージングと、心理行動評価を組み合わせたマルチ・ディシプリナリ・アプローチをもちいることにより、人間の「動かす脳」の主要な構成要素が、「考える脳」として機能することが描き出された。また無意識のうちに環境を捉える「感じる脳」は、報酬系神経回路を介することによって行動を制御することがあきらかとなった。今後は、これら3つの脳を協調させつつ人間が新しい能力を獲得していくメカニズムの解明を目指していく予定である。

1. 研究のねらい

人間において高度に発達した思考過程は、抽象化した情報を自由に操作することを可能にし、科学技術の発展を通して高度な文明社会を築いてきた。一方で、環境からの制約を失った思考過程が暴走すると、脳内世界が歪み、現実環境との間に深刻な不調和をおこすような事態も生じている。自由度の高い思考過程が、どのようにして環境との調和を保つようにコントロールされているかを解明することは、モノとココロを結ぶ脳の仕組みについての理解を深め、現代社会で深刻な問題となっているココロの荒廃に対する生理学的なアプローチの道を拓く上で少なからぬ貢献を果たすことが期待される。

近年ヒトを対象とした非侵襲脳機能測定、ヒト以外の霊長類を対象とした詳細な神経解剖生理学的検討ならびに計算論的神経科学が長足の進歩を遂げ、これまで運動制御装置と考えられてきた脳領域の機能が運動制御にとどまらず広く知的活動に関与することが示されつつある。デカルトの物心二元論以来、これまでの脳科学では暗黙のうちに2つの対立する機能として扱われることが多かった「モノ」を制御する運動と「ココロ」を制御する思考とは、多くの神経機構と作動原理を共有する情報処理過程である可能性が否定できない。現実世界を「動かす脳」と頭の中で「考える脳」とが協調して働くメカニズムを探る中で、思考と現実世界を結ぶメカニズムが見えてくる可能性がある。

また多数の行動選択肢の中から、環境にあった最適な運動と思考がいかに選択されるのかを考えると、「快さ」や「美しさ」といった感性の関与を想定する必要がある。環境から与えられる情報は「感じる脳」によって処理され、接近行動や逃避行動を誘発すると考えられるが、思考や行動が本人の自覚しないうちに特定の方向へと導かれてしまうような場合には、意識で捉えることのできない環境情報を「感じる脳」が「考える脳」や「動かす脳」をより高い次元からコントロールするメカニズムを考える必要がある。

本研究では、「考える脳と動かす脳の共通性」および「環境を感じる脳による行動制御」を切り口として、思考が環境との間で協調的・調和的に制御される脳内メカニズムにアプローチすることを目指した。

2. 研究経緯と成果

「考える脳」と「動かす脳」の共通性

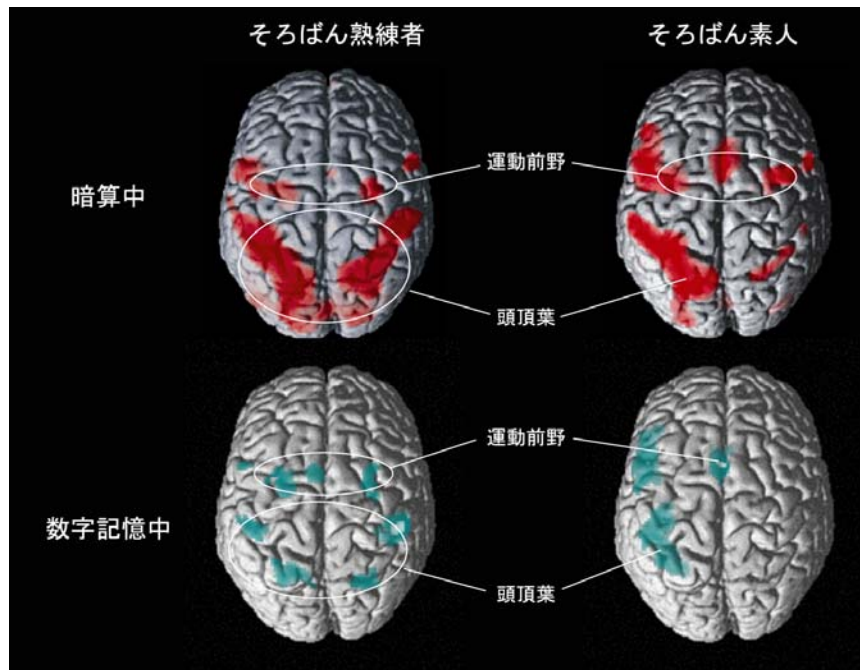
「考える脳」と「動かす脳」との共通性を探るにあたり、私たちは比較認知科学的な視点を導入しつつ、「考える」ことに必須の基礎的な過程は何かを考えてみた。そして運動の必要条件が「実空間に存在する物体の物理的パラメータを更新する」ことであるのに対応して、思考の必要条件は「メモリー空間に展開する表象を更新する」ことであると仮定し、表象の更新に関わる脳（「考える脳」）と物理的パラメータの更新に関わる脳（「動かす脳」）との関連を検討した。

(1) そろばん熟練者の優れた暗算能力は「動かす脳」が支える

まず私たちは、そろばんの熟練者が示す優れた暗算能力に着目した。そろばん熟練者は、ルールに従ってそろばんを指で操るという複雑な視覚運動制御の学習を通して、数の表象を空間表象に変換して脳のメモリーの中にインストールしその表象を操作することにより、そろばんを使うことなしに驚くほど大きな桁数の計算を正確におこなうことが可能になる。そのトレーニングの過程は「動かす脳」と「考える脳」との関連を考えるうえで示唆に富んでいる。すなわち最初は耳で問題を聞き、指でそろばんをはじき、その結果を目で確認しているのであるが、段階的に視覚情報を取り除き、道具を使用せず、指運動を抑制することにより、すべての計算を頭の中でおこなってしまう。すなわちこうしたトレーニングによって、実空間に存在する物体（そろばんの珠の配列パターン）を更新する行為が、メモリー空間の表象（脳内そろばんの配列パターン）を更新する思考へと徐々に切り替わっていくと考えられる。私たちは、そろばん熟練者が6桁の加減算をそろばんを用いずに暗算で行っているときの脳活動を磁気共鳴機能画像で計測したところ、複雑な視覚運動制御で重要な中枢である

両側の頭頂葉皮質と背外側運動前野が強く活動することを見いだした。

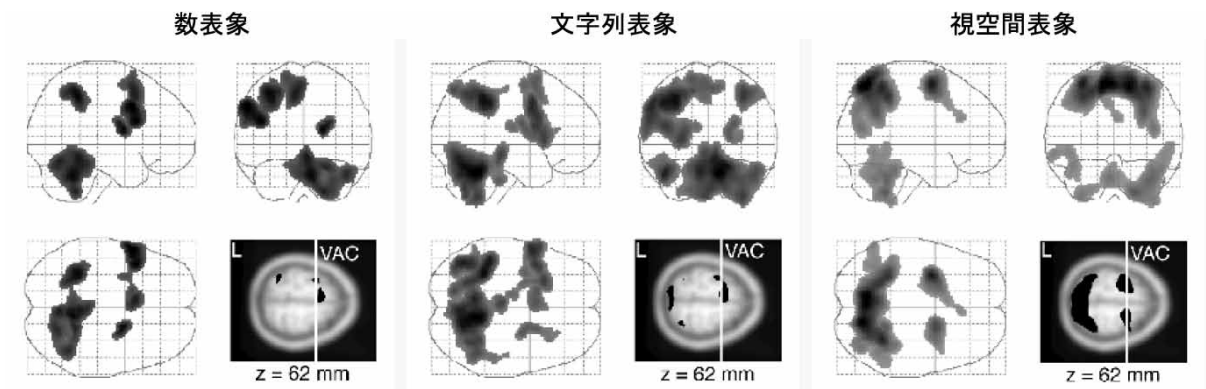
さらに、そろばんの熟練者が数列を単純に記憶しているときの脳活動を計測したところ、数を空間表象に変換して保持するときに、「動かす脳」の重要な要素である背外側運動前野が強く活動することを示し、背外側運動前野は操作の種類によらず空間表象に特異的な役割を担っていることを明らかにした。これらの実験事実は、現実世界を「動かす脳」のもつ底知れない能力を活用することの有効性を示しているのではないかと考えられる。



(2) 「動かす脳」の重要な要素である運動前野と補足運動野は「考える脳」でもある

そろばん熟練者の暗算実験のなかで対照となったそろばん経験のない通常の人が暗算をおこなうときの脳活動をみてみると、左側に限定してはいるものの、そろばん熟練者と同様に背外側運動前野に強い活動が観察されるのである。さらに、やはり「動かす脳」の重要な構成要素である前補足運動野は、むしろそろばん熟練者よりも強い活動が認められる。そろばんの熟練者は、個人の体験に基づく学習によって「動かす脳」を「考える脳」へと切り替えていったが、そろばん経験のない人でも「動かす脳」が計算に使われているということは、進化の過程で物体のパラメータ更新につかわれる脳が、表象を更新するために使われるように発達していったのではないかと考えられる。そこでこの仮説を検証するために、厳密に運動の要素を排除した心内表象操作課題をもちいて、数表象、文字列表象(あるいは言語表象)、空間表象を更新するときの脳活動をポジトロン断層撮像法と機能的磁気共鳴画像マッピング法を組み合わせ計測した。その結果、運動は全く発現していないにもかかわらず、表象の更新操作を行っているときに、小脳、大脳基底核、大脳皮質ブロードマン6野(運動前野お

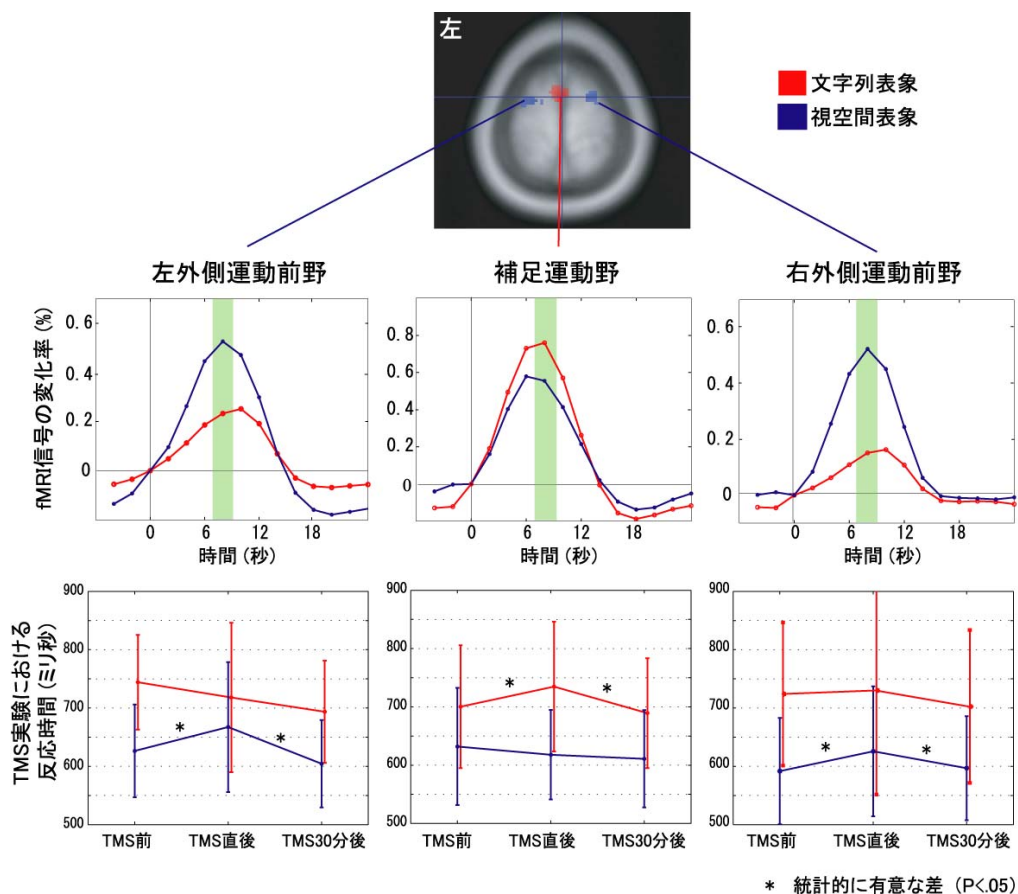
よび補足運動野) 吻側部といった「動かす脳」の主要な構成要素であるの活動が高まっていることを明らかにした。



さらに表象ごとの違いをみてみると、大脳皮質ブロードマン6野のなかでも外側に位置する運動前野の活動は、現実世界にマップすることの可能な空間表象の更新操作をするときに強く活動するのに対して、より抽象的な数表象や文字列表象の更新操作をおこなうときには、内側に位置する補足運動野と大脳基底核がより強く活動していた。脳の外側にある運動前野は感覚誘導性の運動、内側にある補足運動野は自発的な運動の制御にそれぞれ密接に関連することが知られている。すなわち「動かす脳」としての役割分担が、「考える脳」としても共通している可能性が示唆される。

一方、ポジトロン断層撮像法や磁気共鳴機能画像で描き出されたこれら「動かす脳」の活動は、本当に思考に不可欠の役割を担っているのか、それともたまたま副産物として出てきたものなのか知ることができない。特に進化的な変化を考慮した場合、これらの活動が進化の痕跡として残っているだけなのか、それとも積極的に表象の更新操作にかかわっているかを同定することは極めて重要である。そこで経頭蓋磁気刺激法をもちいて外側の運動前野と内側の補足運動野の機能を一過性に干渉し、文字列表象と空間表象の操作にかかる時間がどのように変化するかを検討した。

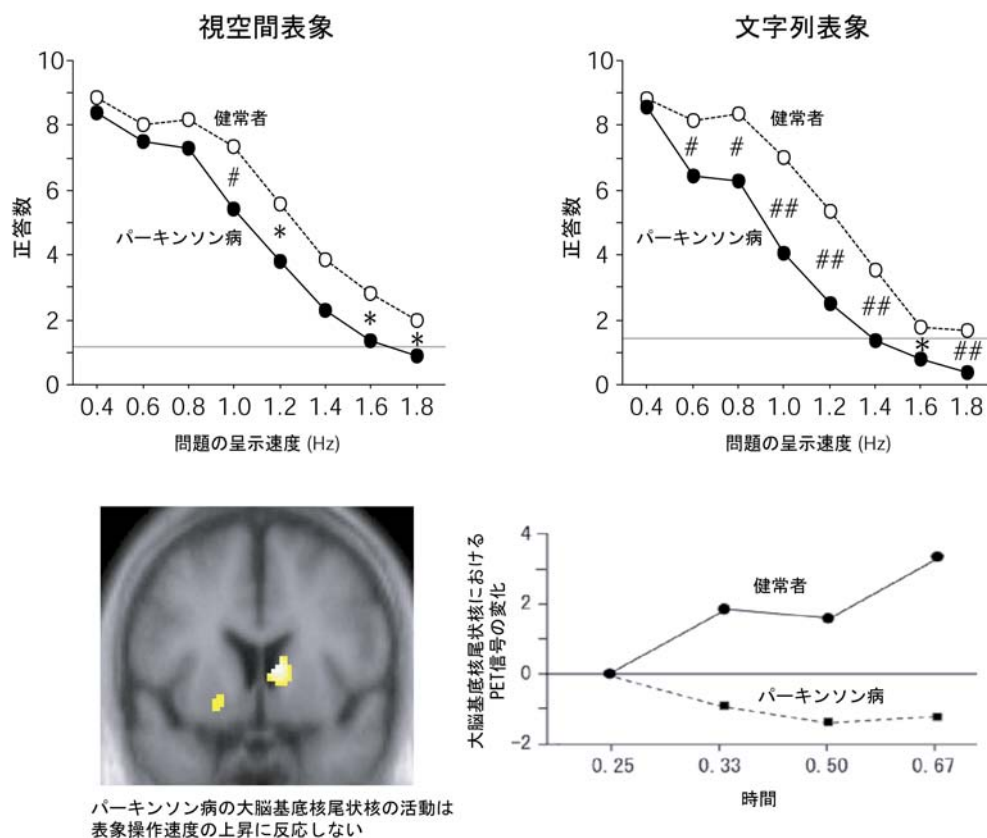
その結果、外側の運動前野を刺激したときには左右を問わず、空間表象の更新にかかる時間が延長するのに対して、文字列表象の操作にかかる時間は影響を受けなかった。逆に、内側の補足運動野を刺激したときには、文字列表象の更新にかかる時間が延長するのに対して、空間表象の更新にかかる時間が影響を受けなかった。これらの実験結果は、「動かす脳」の重要な構成要素である運動前野と補足運動野が、「考える脳」としても不可欠の役割を果たしており、しかも運動を制御するときに見られたような役割分担が、思考の基礎過程である表象を操作するときにも見られることを示唆している。



(3) 「動かす脳」の障害は「考える脳」の機能低下につながる

「考える脳」と「動かす脳」が大きな共通項をもっているとすると、これまで「動かす脳」の障害と考えられてきた多くの運動疾患で、なんらかの認知機能が低下している可能性が強い。実際、運動制御の重要な中枢である小脳が障害されると、運動失調以外にもさまざまな認知機能障害が生じることが報告されている。私たちは典型的な運動疾患のひとつであるパーキンソン病の患者さんで運動速度が低下する、すなわち運動パラメータの更新速度が遅くなることに着目し、同様の症状がメモリー空間に展開した表象を更新するときにも認められるのではないかと予測のもとに、パーキンソン病における認知操作速度を評価した。運動制御の要素を排して認知的操作速度を評価する課題を開発し、文字列表象と空間表象とで認知的操作速度をみてみたところ、パーキンソン病の場合、いずれの種類の表象操作でも速度が遅いときには良好な成績を示すのに対して、速度が上昇すると対照群よりも有意に成績が低下することがあきらかとなった。さらに文字列表象と空間表象とを比較してみると、更新操作速度の低下は文字列表象でより顕著であった。このことは、先の研究で文字列表象の操作が「動かす脳」の中でもパーキンソン病で障害される大脳基底核や補足運動野に依存していることとよく対応する。さらに心内表象操作課題をおこなっているときの脳活動をポジト

ロン断層撮像法をもちいて観察することにより、パーキンソン病における表象操作速度の低下が脳基底核尾状核頭部の活性障害に起因することを実証的に明らかにした。

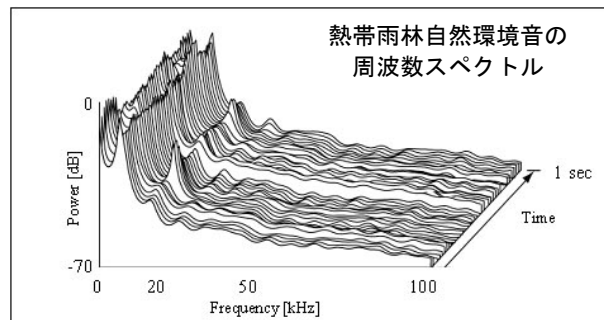


環境を「感じる脳」による行動制御

私たちはこれまでに楽器音をつかって、人間の可聴域上限をこえる高周波成分が視床と脳幹を活性化し、音を快適に感じさせる効果をもつことを報告してきた。本研究では、こうした知覚限界を超えた情報と環境、そして行動制御との関連について検討をおこなった。

(1) 熱帯雨林環境音には知覚できない情報が豊富に含まれている

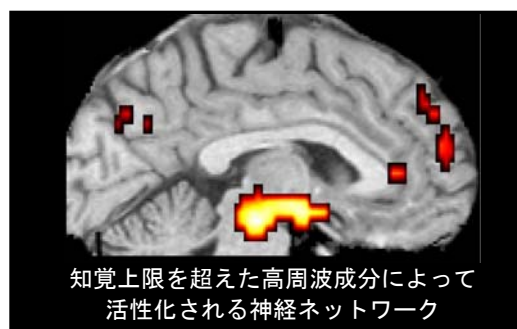
こうした知覚限界を超える音成分が、人類の遺伝子が進化的に形成されたと考えられる熱帯雨林の環境音にも含まれているかどうかを検証した。その結果、熱帯雨林の自然環境音には、人間の可聴域上限の 20kHz を大きく超え 100kHz に達するような高周波成分が顕著に認められることが明かとなった。さらに最大エントロピー法を応用した手法をもちいて 20 msec ほどのパワースペクトルを求めて時間的変化を観察してみると、複雑に変化するマイクロなゆらぎが顕著であった。一方、都市の環境音を記録してみると、可聴域帯域では大きなパワーを示す一方で、周波数の上限が 20 kHz を超えることはきわめて稀であり、時間的にも極めて乏しい単調な変化を示していた。これらの結果は、環境音の物理的特性と、人間の行動制御との関連を考える上で重要な意味をもっていると考えられる。



(2) 知覚できない音による感性反応は脳幹部と前頭前野の連動による

熱帯雨林に存在するような人間の可聴域上限を超える高周波成分は、音を快適に感じさせる効果をもつことが知られている。その背景となる脳内のメカニズムを探るために、ポジトロン断層撮像法をもちいて非可聴域超高周波成分を豊富に含む音を聴いているとき、同じ音源から超高周波成分を除去した音を聴いているとき、暗騒音（ベースライン）を聴いているときの脳血流を計測した。そのデータに主成分分析を適用し、異なる条件間で互いに相関して活動する神経ネットワークの全体像を抽出した。

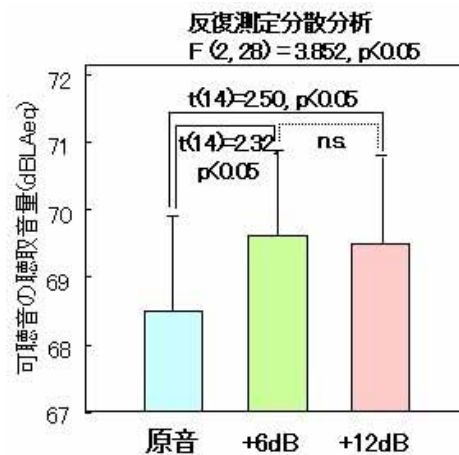
その結果、第一成分として両側聴覚野を含む成分が抽出された。またそれと直行する第二成分として視床、視床下部、脳幹を中心として、前頭前野および前帯状回へと広がる成分が抽出された。脳幹部から前頭前野に至る神経回路は、快感を誘導する報酬系として働くモノアミン投射系を含み、人間の行動を強力に制御することが知られている。すなわち、ここで得られた第二主成分に相当する神経回路は、知覚できない環境情報によって行動を制御する時に動員される「感じる脳」に相当するのではないかと考えられる。



(3) 知覚できない音によって接近行動がひきおこされる

こうした知覚できない環境情報が引き起こす人間の接近行動を明らかにするために、さまざまな音呈示を行っているときに被験者がもっとも快適に感じるように自由にボリューム調整をさせた。そして知覚できない成分の有無あるいはその強さの変化によって、被験者がどの程度の音量を好むかを最適聴取レベルとして計測した。その結果、可聴域上限をこえる高

周波成分を含まない音よりも含む音のほうを、またさらに超高周波成分のみを+6dB 増強した音のほうを、より大音量で聞こうとすることを発見した。この実験では、ボリュームの大きさは被験者は直接知ることはできないので、快適感のみをたよりとして行動制御は行われる。おそらく上記で描き出された神経回路の働きを介して、呈示された音情報をより大量に受容しようとする接近行動を誘発したものと考えられる。



3. 今後の展望

本研究を通して、「考える脳」と「動かす脳」の共通性と、無意識に「感じる脳」による行動制御のメカニズムが明らかになりつつある。今後は、運動と認知が神経機構を共有化することが人間の日常生活に果たす役割を明らかにし、その成果の社会還元をはかることを目指していきたい。そのため、現在最大の教育問題のひとつとなっている「運動と認知の協調制御による汎用的能力獲得」を支える神経機構の解明へと展開していきたいと考えている。

「一芸に秀でるものは多芸に長ずる」という言葉が典型的に描き出すように、わが国の伝統社会では、一つの技能や能力の習得を通して全般的全人的な活性向上をはかる教育システムが確立していた。武道・書道・茶道など「道」という概念に集約されるこうした汎用的能力の開発戦略では、現実世界の物体を制御する感覚運動の練磨を通して、知的能力のみならず人格的育成をはかろうとし、その成果は歴史の中で高い信頼性をもって確認されてきている。この「道」に集約される学習と教育の背景には、「考える脳」「動かす脳」「感じる脳」が協調してフル稼働していることが予想される。そこで運動と認知の協調により汎用的能力開発を支える神経基盤を明らかにし、「汎用的能力開発戦略」に基づく教育システムの構築に応用していきたい。

発表リスト

論文

1. Hanakawa T, Honda M, Sawamoto N, Okada T, Yonekura Y, Fukuyama H, Shibasaki H (2002) The Role of Rostral Brodmann Area 6 in Mental-operation Tasks: an Integrative Neuroimaging Approach. *Cereb Cortex* 12:1157-1170.
2. Oohashi T, Kawai N, Honda M, Nakamura S, Morimoto M, Nishina E, Maekawa T (2002) Electroencephalographic measurement of possession trance in the field. *Clin Neurophysiol*, 113:435-445.
3. Sawamoto N, Honda M, Hanakawa T, Fukuyama H, Shibasaki H (2002) Cognitive slowing in Parkinson's disease: a behavioral evaluation independent of motor slowing. *J Neurosci* 22:5198-5203.
4. Tanaka S, Michimata C, Kaminaga T, Honda M, Sadato N (2002) Superior digit memory of abacus experts: an event-related functional MRI study. *Neuroreport* 13:2187-2191.
5. Hanakawa T, Honda M, Okada T, Fukuyama H, Shibasaki H (2003) Neural correlates underlying mental calculation in abacus experts: functional magnetic resonance imaging study. *Neuroimage* 19:296-307.
6. Hanakawa T, Honda M, Okada T, Fukuyama H, Shibasaki H (2003) Differential activity in the premotor cortex subdivisions during mental calculation and verbal rehearsal tasks: a functional MRI study. *Neuroscience Letters*, 347:199-201.
7. Yagi R, Nishina E, Honda M, Oohashi T (2003) Modulatory effect of inaudible high-frequency sounds on human acoustic perception. *Neuroscience Letters*, 351:191-195.
8. Hanakawa T, Honda M, Hallett M (2005) Amodal imagery in rostral premotor areas. *Behavioral and Brain Sciences*, In press.
9. Tanaka S, Honda M, Sadato N (2005) Modality-Specific Cognitive Function of Medial and Lateral Human Brodmann Area 6. *J Neurosci*, In press.

口頭発表

1. Kato H, Honda M. Nonlinear time series modeling for corticomuscular functional coupling. 8th International Conference on Functional Mapping of the Human Brain, Sendai, Japan (Jun, 2002).

2. Oohashi T, Kawai N, Honda M, Nakamura S, Morimoto M, Nishina E, Maekawa T. Electroencephalographic measurement of possession trance in the field. 8th International Conference on Functional Mapping of the Human Brain, Sendai, Japan (Jun, 2002).
3. Tanaka S, Michimata C, Kaminaga T, Honda M, Sadato N. Superior digit memory of abacus experts: An event-related functional MRI study. 8th International Conference on Functional Mapping of the Human Brain, Sendai, Japan (Jun, 2002).
4. Yagi R, Nishina E, Kawai N, Honda M, Maekawa T, Nakamura S, Morimoto M, Sanada K, Toyoshima M, Oohashi T. Auditory Display for Deep Brain Activation: Hypersonic Effect. The 8th International Conference on Auditory Display, Kyoto, Japan (Jul, 2002).
5. 田中悟志、道又爾、神長達郎、本田学、定藤規弘：そろばん熟練者の優れた数字記憶に関わる神経基盤。第25回日本神経科学大会、東京（2002年7月）
6. Kawai N, Honda M, Nakamura S, Samatra P, Nakatani Y, Oohashi T. Neurobiological study on possession trances. XII World Congress of Psychiatry, Yokohama, Japan (Aug, 2002).
7. Honda M, Hanakawa T, Sawamoto N. Differential activation of rostral part of premotor cortex in mental operation. Society for Neuroscience 32th Annual Meeting, Orland, USA (Nov, 2002).
8. 八木玲子、仁科エミ、河合徳枝、本田学、中村聡、森本雅子、大橋力：ハイパーソニック・サウンドの呈示条件が音の受容行動に及ぼす影響—ハイパーリアル・エフェクトの研究（I）—. 日本音響学会2003年春季研究発表会公演論文集 pp. 721-722、東京（2003年3月）
9. 仁科エミ、河合徳枝、中村聡、本田学、八木玲子、森本雅子、前川督雄、大橋力：生理活性物質を指標とするハイパーソニック・エフェクトの検討—ハイパーリアル・エフェクトの研究（III）—. 日本音響学会2003年春季研究発表会公演論文集 pp. 725-726、東京（2003年3月）
10. 本田学、中村聡、八木玲子、仁科エミ、森本雅子、河合徳枝、大橋力：ポジトロン断層画像法によるハイパーソニック・エフェクトの神経生理学的検討—ハイパーリアル・エフェクトの研究（IV）—. 日本音響学会2003年春季研究発表会公演論文集 pp. 727-728、東京（2003年3月）

11. 森本雅子、仁科エミ、八木玲子、本田 学、中村 聡、河合徳枝、前川督雄、大橋 力：最大エントロピースペクトルアレイ法による生物学的音楽概念の検討ーハイパーリアル・エフェクトの研究 (V)ー. 日本音響学会 2003 年春季研究発表会公演論文集 pp. 841-842、東京 (2003 年 3 月)
12. 大橋 力、河合徳枝、本田 学、中村 聡、仁科エミ、八木玲子、森本雅子、前川督雄：ハイパーソニック・エフェクトの生理学. AES Tokyo Convention 2003、東京 (2003 年 7 月)
13. 本田 学、花川 隆：心内表象操作における物側運動前野の反応特異性. 第 26 回神経科学大会、名古屋 (2003 年 7 月)
14. Tanaka S, Honda M, Sadato N. Repetitive transcranial magnetic stimulation of the pre-supplementary motor area differentially affects performance of verbal and spatial mental-operation tasks. Society for Neuroscience 33rd Annual Meeting, New Orleans, USA (Nov, 2003).
15. Sawamoto N, Honda M, Hanakawa T, Fukuyama H, Shibasaki H. Cognitive slowing associated with striatal hypofunctioning in Parkinson's disease. The 31st National Institute for Physiological Sciences International Symposium, Okazaki, Japan (Mar, 2004).
16. Tanaka S, Honda M, Sadato N. Functional specificity of the rostral part of brodmann area 6 in verbal and spatial mental-operation tasks: a repetitive transcranial magnetic stimulation study. The 31st National Institute for Physiological Sciences International Symposium, Okazaki, Japan (Mar, 2004).
17. Morimoto M, Nishina E, Yagi R, Kawai N, Nakamura S, Honda M, Maekawa T, Oohashi T. Transcultural study on frequency and fluctuation structure of singing voices. Proceedings of The 18th International Congress on Acoustics, 55-58, Kyoto, Japan (Apr, 2004).
18. Nakamura S, Morimoto M, Nishina E, Yagi R, Kawai N, Honda M, Maekawa T, Oohashi T. Frequency and fluctuation structure of various environmental sounds. Proceedings of The 18th International Congress on Acoustics, 3459-3460, Kyoto, Japan (Apr, 2004).
19. Nishina E, Morimoto M, Yagi R, Kawai N, Nakamura S, Honda M, Maekawa T, Oohashi T. Structural analysis of musical instrumental sounds based on the

- biological concept of music. Proceedings of The 18th International Congress on Acoustics, 493-494, Kyoto, Japan (Apr, 2004).
20. Honda M, Nakamura S, Yagi R, Morimoto M, Maekawa T, Nishina E, Kawai N, Oohashi T. Functional neuronal network subserving the hypersonic effect. 10th Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping, NeuroImage 22(S1) TU242, Budapest, Hungary (Jun, 2004).
 21. Tanaka S, Honda M, Sadato N. Functional specificity of the rostral part of Brodmann area 6 in verbal and spatial mental-operation: a low-frequency repetitive transcranial magnetic stimulation study. 10th Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping, NeuroImage 22(S1) TH157, Budapest, Hungary (Jun, 2004).
 22. 本田 学 : 高次行動の機能要素と脳部位連関、第 8 1 回日本生理学会大会、札幌 (2004 年 6 月)
 23. Tanaka S, Honda M, Sadato N. Domain specific working memory process of non-primary motor cortex: a combined fMRI and rTMS study. Second International Conference for Working Memory, Kyoto, Japan (Aug, 2004).
 24. Nakamura S, Honda M, Morimoto M, Yagi R, Nishina E, Kawai N, Maekawa T, Oohashi T. Electroencephalographic evaluation of the hypersonic effect. Society for Neuroscience 34th Annual Meeting, San Diego, USA (Oct, 2004).
 25. 本田 学 : 後頭部優位律動脳波の神経基盤～脳血流画像による検討～、第 3 4 回日本臨床神経生理学会学術大会、東京 (2004 年 11 月)